

УДК 621.3.01

И. А. КОСТЮКОВ**ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RC ЦЕПОЧЕК**

Рассматриваются задачи, связанные с преобразованием импульсов напряжения, вызванных апериодическим разрядом накопительного конденсатора, с использованием дифференцирующей RC цепочки, а также с фильтрацией низкочастотной компоненты напряжения на выходе синхронного детектора с использованием интегрирующей RC цепочки. Для указанных задач приведены формулы для расчета временных зависимостей сигналов на выходе преобразовательной цепочки. Проанализировано влияние постоянной времени дифференцирующей RC цепочки на соотношение между моментами времени, которые соответствуют максимальному значению апериодического импульса на входе цепочки и изменению полярности напряжения на выходе RC цепочки.

Ключові слова: интегрирующая цепочка, апериодический импульс напряжения, постоянная времени, импульсная характеристика, преобразование Лапласа.

I. О. КОСТЮКОВ**ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЕЯКИХ СИГНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RC ЛАНЦЮЖКІВ**

Розглянуті задачі, що пов'язані із перетворенням імпульсів напруги, викликаних апериодичним режимом розряду накопичувального конденсатора, із використанням RC ланцюжка, а також із фільтрацією низькочастотної компоненти напруги на виході синхронного детектору із використанням інтегруючого RC ланцюжка. Для вказаних задач наведені формули для розрахунку залежностей сигналів на виході перетворювального ланцюжка від часу. Проаналізовано вплив постійної часу RC ланцюжка для диференціювання сигналів на співвідношення між моментами часу в які спостерігається максимальне значення апериодичного імпульсу на вході перетворювального ланцюжка та зміна полярності напруги на виході RC ланцюжка.

Ключевые слова: интегрирующий ланцюжок, апериодичний імпульс напруги, постійна часу, імпульсна характеристика, перетворення Лапласа.

I. O. KOSTIUKOV**PARTICULAR QUALITIES OF SOME SIGNALS CONVERSIONS BY MEANS OF APPLYING RC CIRCUITS**

The problems associated with the conversion of voltage pulses caused by overdamped discharge of the storage capacitor using a differentiating RC circuit, as well as filtering the low-frequency component of voltage on the output of a synchronous detector using an integrating RC circuit, are considered. For these tasks, formulas are given for calculating the time dependences of the signals on the output of the converter circuit. The influence of time constant of differentiating RC circuit on ratio between the moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit is analyzed. It was shown that the ratio between the moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit can be used in order to determine the accuracy of differentiating of voltage pulses caused by overdamped discharge of the storage capacitor. The increasing of accuracy of differentiating is accompanied by the decreasing of difference between moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit.

Keywords: RC circuit for integration, overdamped voltage pulse, time constant, Laplace transform.

Введение. Во многих технических приложениях возникает необходимость анализировать результаты преобразований, связанных с прохождением различных аналоговых сигналов через интегрирующие и дифференцирующие RC цепочки с различной величиной постоянной времени. К типичным примерам относятся: выделение низкочастотной составляющей на выходе синхронных детекторов в различных радиотехнических устройствах [1-3], определение моментов времени в которые сигнал принимает максимальные значения, а также определение величины заряда, который переносится через разрядную цепь вследствие разряда накопительного конденсатора [4]. Методы решения задач, связанных с преобразованием сигналов вследствие их прохождения через линейные цепи, в

частности через RC цепочки, разработаны достаточно подробно. В то же время, для удобства практического применения целесообразно иметь выражения для описания сигналов на выходе преобразовательных цепочек, как функций времени, для достаточно большого количества различных сигналов. В данной статье приводятся формулы для расчета временных зависимостей напряжения на выходе преобразовательной RC цепочки при воздействии на нее напряжения с выхода умножителя аналоговых сигналов синхронного детектора, а также с повторителя напряжения, на входе которого действует напряжение, повторяющее по форме кривую разрядного тока при апериодическом разряде накопительного конденсатора.

© И. А. Костюков, 2019

Цель статьи заключается в анализе выражений для определения напряжения на выходе преобразовательной цепи, как функции времени, при воздействии на RC цепочку сигнала, имеющего в своем составе по отношению к опорному сигналу компоненты на суммарной и разностной частоте, а также при воздействии на RC цепочку экспоненциальных импульсов, возникающих при апериодическом разряде конденсатора.

Воздействие напряжения с выхода синхронного детектора на интегрирующую RC цепочку. Напряжение на выходе RC цепочки обычно получают в виде свертки импульсной характеристики фильтра и сигнала на входе цепочки:

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_0^t U_{\text{вх}}(\tau) h(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $h(t)$ импульсная характеристика интегрирующей RC цепочки, которая может быть записана в следующем виде [5]:

$$h(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление преобразовательной цепочки;

C – величина емкости преобразовательной цепочки.

Временную зависимость входного сигнала, который получается как результат умножения опорного сигнала на анализируемый сигнал, можно записать в виде:

$$U_{\text{вх}}(t) = A_1 A_2 \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t + \varphi), \quad (3)$$

где A_1, A_2 – амплитуды сигналов перемножаемых сигналов;

ω_1 и ω_2 – угловая частота перемножаемых сигналов;

φ – величина фазового сдвига между перемножаемыми сигналами.

Напряжение на выходе RC цепочки будем определять в виде суммы двух слагаемых $u_1(t)$ и $u_2(t)$, которые соответствуют разностной и суммарной частоте сигнала в (3).

$$U_{\text{вых}}(t) = u_1(t) + u_2(t). \quad (4)$$

В таком случае, выполняя интегрирование согласно (1), напряжение на выходе RC цепочки можно записать в виде:

$$u_1(t) = \frac{0.5 A_1 A_2 (\Omega_0 - \Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 + \Omega_5) e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + M^2 \tau^2}, \quad (5)$$

где все $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ могут быть определены по формулам (6-11):

$$\Omega_0 = -\cos(\varphi), \quad (6)$$

$$\Omega_1 = M\tau \sin(\varphi), \quad (7)$$

$$\Omega_2 = e^{\frac{t}{\tau}} \cos(tM) \cos(\varphi), \quad (8)$$

$$\Omega_3 = e^{\frac{t}{\tau}} \sin(tM) \sin(\varphi), \quad (9)$$

$$\Omega_4 = e^{\frac{t}{\tau}} M\tau \sin(tM) \cos(\varphi), \quad (10)$$

$$\Omega_5 = e^{\frac{t}{\tau}} M\tau \cos(tM) \sin(\varphi). \quad (11)$$

В формулах (6-11) постоянная M определяется в соответствии с (12):

$$M = 2\pi(f_2 - f_1). \quad (12)$$

Определение компоненты напряжения на выходе, обусловленной компонентом входного сигнала на суммарной частоте $u_2(t)$, можно проводить по формулам (5-12), с заменой M на m , определяемую согласно (13):

$$m = 2\pi(f_2 + f_1). \quad (13)$$

В качестве примера на рис. 1 приведена временная зависимость напряжения на выходе интегрирующей RC цепочки при воздействии на входе сигнала с параметрами: $A_1 = A_2 = 1$ В, $\varphi = 60^\circ$, Параметры интегрирующей цепочки принимались равными: $R = 10^6$ Ом, $C = 1$ мкФ.

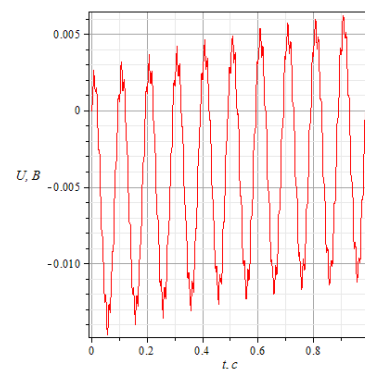


Рисунок 1 – Напряжение на выходе RC цепочки

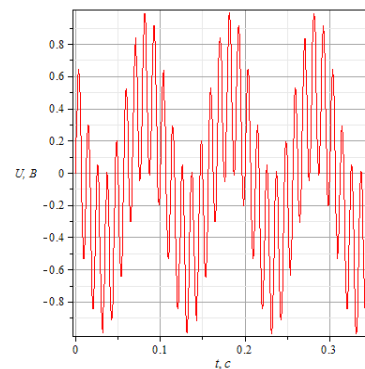


Рисунок 2 – Напряжение на входе RC цепочки

Воздействие на RC цепочку импульса напряжения, возникающего вследствие

апериодического разряда накопительного конденсатора. При определении напряжения на выходе дифференцирующей цепочки искомое напряжение будем определять как оригинал от изображения, равного произведению передаточной характеристики RC цепочки и преобразованию Лапласа от входного сигнала. Передаточная характеристика дифференцирующей RC цепочки может быть записана в виде [5]:

$$K(p) = \frac{p\tau}{1 + p\tau}. \quad (14)$$

Апериодический импульс входного напряжения обычно может быть описан как сумма двух экспонент:

$$U_{вх}(t) = Ae^{Bt} + Ce^{Dt}. \quad (15)$$

В таком случае преобразование Лапласа от входного напряжения (15) может быть записано в виде:

$$U_{вх}(p) = \frac{A}{p-B} + \frac{C}{p-D}. \quad (16)$$

Принимая во внимание (14) и (16), напряжение на выходе дифференцирующей RC цепочки при наличии на входе апериодического импульса, возникающего вследствие разряда накопительного конденсатора, в операторной форме может быть записано в соответствии с (17):

$$U_{вых}(p) = \left(\frac{A}{p-B} + \frac{C}{p-D} \right) \cdot \frac{p\tau}{(1+p\tau)} = \frac{p^2\tau A - p\tau AD + p^2\tau C - p\tau CB}{(1+p\tau)(p-B)(p-D)}. \quad (17)$$

В соответствии с одной из общих схем определения оригинала операторного выражения, оригинал выражения для напряжения на выходе RC цепочки будем искать в виде:

$$U_{вых}(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{Y(p_k)}{J'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (18)$$

где все p_k соответствуют корням уравнения (19):

$$(p-B)(p-D)(1+p\tau) = 0. \quad (19)$$

Все $Y(p_k)$ в (18) соответствуют значениям числителя из (17) в точках, соответствующих корням уравнения (19), все $J'(p_k)$ в (18) соответствуют значениям производной от знаменателя из (17) по параметру p в точках, соответствующих корням уравнения (19).

Производная от знаменателя в (19) по параметру p может быть записана в виде:

$$\frac{dJ}{dp} = 2p - D - B + 3p^2\tau - 2p\tau D - 2s\tau B + \tau BD. \quad (20)$$

Таким образом, с учетом (20), оригинал выражения (17), которое определяет напряжение на активном сопротивлении RC цепочки в операторной форме, можно записать согласно (21):

$$U_{вых}(t) = \Theta_1(t) + \Theta_2(t) + \Theta_3(t). \quad (21)$$

где $\Theta_1(t)$, $\Theta_2(t)$, и $\Theta_3(t)$ могут быть определены с использованием (22-24):

$$\Theta_1(t) = \frac{B^2\tau A - B\tau AD}{B - D + B^2\tau - \tau BD} e^{Bt}, \quad (22)$$

$$\Theta_2(t) = \frac{D^2\tau C - D\tau CB}{D - B + D^2\tau - \tau BD} e^{Dt}, \quad (23)$$

$$\Theta_3(t) = \frac{A + D\tau A + C + p\tau CB}{1 + D\tau + \tau B + \tau^2 BD} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (24)$$

На рис. 3-5 приведены графики, характеризующие общие закономерности влияния постоянной времени на напряжение на выходе RC цепочки.

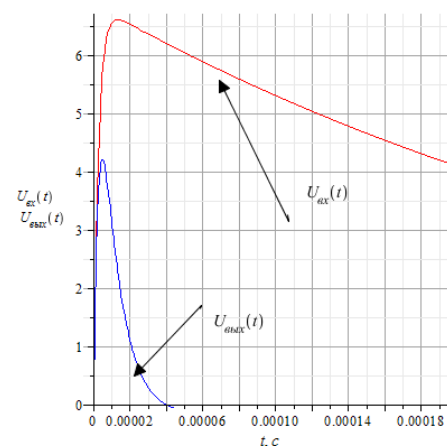


Рисунок 3 – Зависимости напряжения на входе и выходе RC цепочки при $C = 99.57 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R = 100$ Ом

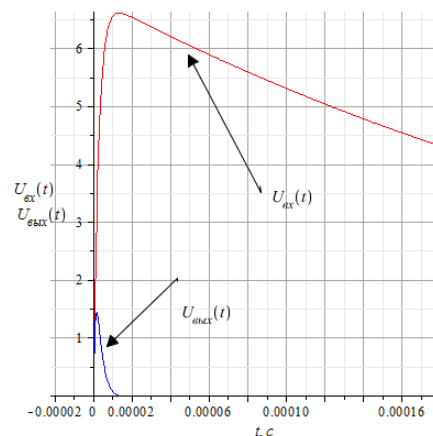


Рисунок 4 – Зависимости напряжения на входе и выходе RC цепочки при $C = 99.57 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R = 10$ Ом

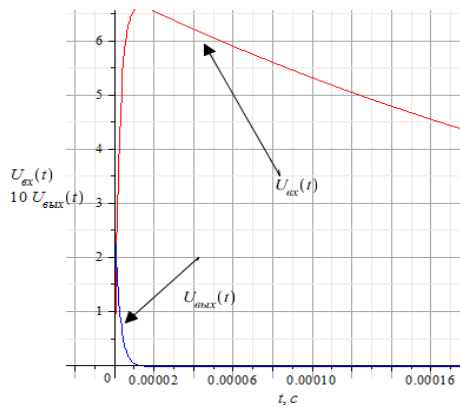


Рисунок 5 – Зависимости напряжения на входе и выходе RC цепочки при $C = 99.57 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R = 1$ Ом.

Увеличение крутизны фронта импульса на выходе RC цепочки сопровождается переносом эффективной ширины спектра сигнала в область высоких частот. Для практических приложений, например при необходимости определения длительности фронта аperiodического импульса, представляет интерес точка, в которой происходит изменение полярности напряжения на выходе RC цепочки. При аperiodическом разряде накопительного конденсатора в момент времени соответствующий максимальному значению разрядного тока напряжение на индуктивности разрядной цепи, пропорциональное производной по времени от разрядного тока, уменьшается до нуля.

Таким образом, одним из критериев правильности выбора постоянной времени RC цепочки при дифференцировании аperiodического импульса напряжения может являться совпадение моментов времени, в которые наблюдается изменение полярности импульса на выходе RC цепочки и максимальное значение импульса напряжения на входе RC цепочки. Влияние постоянной времени RC цепочки на момент времени t_0 , в который наблюдается изменение полярности напряжения на выходе цепочки, рассчитанное по данным на рис. 3-5 показано на рис. 6.

Как видно из данных на рис. 6, при уменьшении постоянной времени разница между t_m и t_0 уменьшается, что свидетельствует об увеличении точности дифференцирования сигнала.

Выводы. В статье приведены формулы для расчета временных зависимостей напряжения на выходе интегрирующей RC цепочки при воздействии на нее напряжения с выхода умножителя аналоговых сигналов синхронного детектора, а также при воздействии на дифференцирующую RC цепочку экспоненциальных импульсов, возникающих при аperiodическом разряде конденсатора. Показано, что определение точности дифференцирования таких импульсов можно проводить

путем сравнения моментов времени, в которые происходит смена полярности напряжения на выходе цепочки с моментом времени, в которые экспоненциальный импульс на входе цепочки принимает максимальное значение.

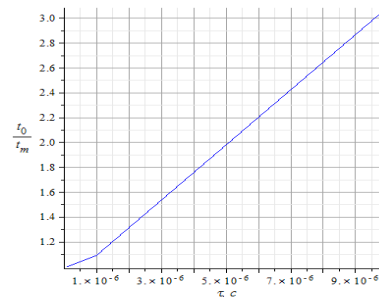


Рисунок 6 – Влияние постоянной времени RC цепочки на соотношение между моментами времени, в которые происходит изменение полярности напряжения на выходе цепочки (t_0) и наблюдается максимальное значение напряжения на входе цепочки (t_m)

Список литературы

1. Ворох Д. А., Данилин А. И., Бояркина У. В. Синхронный детектор для мостикового вихретокового преобразователя. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 4. С. 167 – 170.
2. Ворох Д. А., Данилин А. И., Дудкина Е. Е. Математическая модель синхронного детектора для мостикового вихретокового преобразователя. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 5. С. 391 – 394.
3. Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. Electrocomponent Science and Technology. 1977. № 1. P. 37 – 42.
4. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. 448 с.

References (transliterated)

1. Voroh D. A., Danilin A. I., Bojarkina U. V. Matematicheskaja model' sinhronnogo detektora dlja mostikovogo vihretokovogo preobrazovatelja. [Synchronous detector for bridge eddy current probes]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2017. Vol. 19, no. 5. pp. 167 – 170.
2. Voroh D. A., Danilin A. I., Dudkina E. E. Matematicheskaja model' sinhronnogo detektora dlja mostikovogo vihretokovogo preobrazovatelja. [Mathematical model of synchronous detector for bridge vortex-converter converter]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2018. Vol. 20, no. 5. pp. 391 – 394.
3. Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. Electrocomponent Science and Technology. 1977. № 1. P. 37 – 42.
4. Pejton A. Dzh., Volsh V. Analogovaja jelektronika na operacionnyh usiliteljah [Analog electronics on operational amplifiers]. Moscow, BINOM Publ., 1994. 352 p.
5. Baskakov S. I. Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio circuits and signals]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988. 448 p.

Поступила (received) 16.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюков Иван Александрович (Костюков Иван Александрович, Kostiukov Ivan) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail iakostiukow@gmail.com